第65卷 第6期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 6
2024年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.06.005

SpaceX星链卫星发布星历的研究*

刘媛荣[1,2] 熊永清[1,2,3†] 惠建江[4] 许晓丽[1,2,3] 龚 君[4]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210023)
(4 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要 面对星链卫星(Starlink)严重干扰正常航天活动的现状, 美国太空探索(SpaceX)公司发布的星链星历给星链卫星的相关研究带来契机, 但缺乏明确说明也给进一步使用带来困难. 分析星历文件后发现该星历基本是未来3 d的预报轨道, 平根数研究表明星历文件的前部分是至少考虑20阶非球形引力摄动的外推轨道, 后部分是考虑J_2项摄动的设计轨道, 星历包含协方差信息, 分析发现停泊和工作轨道卫星的星历在前1 d的精度优于2 km, 抬升阶段卫星星历的精度在半天不到的时间内迅速增长至数公里, 通过发布星历的设计轨道可以更加精确地分析星链星座构型, 尤其是各卫星的设计定点位置, 有助于星链卫星的识别和跟踪. 研究为星链星历的广泛应用提供有益参考, 为星链卫星的机动检测和碰撞预警提供依据.

关键词 天体力学, 航天器: 星链卫星, 历表, 方法: 平根数, 方法: 数据分析

中图分类号: P135; **文献标识码**: A

1 引言

随着航天技术的发展和航天产业规模的扩大, 全球商业航天发展迅速, 美国太空探索(SpaceX)、一网(OneWeb)、亚马逊(Amazon)等商业公司相继提出大规模低轨通信星座计划[1]. 其中, SpaceX的星链卫星(Starlink)星座已成为全球最大的低轨巨型星座. 根据SpaceX向美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)提交的相关材料, 该公司预计总共发射4.2万颗低轨卫星, 目前已获批发射1.2万颗. SpaceX计划在540–570 km的轨道高度分别建设5个壳层星座, 相邻高度的壳层间隔10 km, 截至2023年7月31日, 星链第1阶段的建设计划和发射情况如表1所示. 根据各个壳层(shell)的发射情况来看, 壳层1已实现29批次共计1725颗卫星的发射, 是SpaceX首个部署的星座; 壳层4已实现32批次共计1637颗卫星的发射, 是SpaceX第2个主要部署的星座. 另外, 根据表1的数据显示, 壳层1和壳层4的发射卫星数均大于计划的卫星总数. 这可能是因为部分星链卫星在机械故障、地磁暴等因素的影响下失效再入大气层[2].

星链卫星的发射采用可重复使用的猎鹰9号(Falcon 9)火箭, 当火箭到达300 km左右的高度时, 特殊锁定装置会释放卫星实现星箭分离, 此后卫星进入位于350 km左右的停泊轨道, 然后在氪离子推进器的作用下进行轨道抬升, 最终星链卫星将有序抬升到550 km (壳层1)或540 km (壳层4)的工作轨道. 因此, 星链卫星主要有3个发射运行阶段: 停泊、抬升和工作.

2023-08-15收到原稿, 2023-11-29收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12273117)资助

†xyqxcf@pmo.ac.cn

表 1 星链星座第1阶段建设情况
Table 1 Construction status of the first phase of Starlink constellation

Parameter	Shell 1	Shell 2	Shell 3	Shell 4	Shell 5
Orbit altitude/km	550	570	560	540	560
Inclination/°	53	70	97.6	53.2	43
Number of orbit plane	72	36	6	72	28
Satellites per orbit plane	22	20	58	22	120
Number of planned satellite	1584	720	348	1584	3360
Initial launch date	2019-05-24	2021-09-14	2022-07-11	2021-11-13	2022-12-28
Batch of launch	29	8	5	32	21
Number of launched satellite	1725	408	230	1637	867

自2019年5月24日发射第1批星链卫星以来, 截至2023年7月31日, SpaceX已实现95批次共计4867颗卫星的发射. 如此庞大的卫星系统在影响天文观测的同时[3], 也为低轨航天器带来了巨大的碰撞威胁. 2019年9月2日, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)为避免Aeolus气象卫星与Starlink-44卫星发生碰撞, 采取了紧急变轨操作. 2020年4月3日, Starlink-1546和OneWeb-017B之间发生了近距离接近事件. 2021年12月3日, 中国常驻维也纳联合国和其他国际组织代表团向联合国秘书长致以普通照会, 通报了星链卫星先后两次与中国空间站发生的近距离接近事件(2021年7月1日Starlink-1095接近、2021年10月21日Starlink-2305接近). 由此可以看出, 星链卫星已经对正常航天活动造成了严重的干扰. 随着未来更多低轨星座的部署, 这种干扰可能还会加重.

为减小空间目标碰撞的风险, 首先需要掌握空间目标的轨道精度信息, 以便评估它们之间的碰撞风险. 由于星链卫星数量众多, 针对它们的跟踪测量受到设备数量、观测模式与精度、运行能力和测站分布等方面的限制, 导致难以全面获得星链卫星群的高精度星历. 北美防空司令部(North American Aerospace Defense Command, NORAD)根据其编目观测数据, 以双行根数(Two Line Element, TLE)的形式在Space-track网站上发布了星链卫星的编目轨道数据. TLE数据因其完备性、开放性及实时性较好等原因被广泛应用于空间态势分析和空间目标碰撞预警等方面. 文献[4]使用内符合方法分析星链卫星TLE数据的精度, 结果表明对于停泊和工作轨道卫星而言, 预报1 d的位置误差小于3 km, 抬升阶段卫星预报1 d的位置误差小于8 km, 进而对停泊、抬升、工作和降轨4个阶段星链卫星的TLE数据进行碰撞概率的有效性分析, 为星链卫星的碰撞预警工作提供参考. 文献[5]针对稀疏观测数据与机动未知卫星匹配问题, 提出了一种利用TLE数据递归匹配轨道抬升阶段星链卫星观测数据的方法, 为该阶段星链卫星的精密定轨与轨道预报提供思路.

尽管TLE数据在碰撞预警工作中发挥着一定的作用, 但由于星链卫星存在着频繁机动, 导致星链TLE轨道预报精度较低, 且TLE数据没有提供空间目标根数的精度或协方差信息, 无法满足实际应用的要求. 为应对国际航天发射和卫星碰撞预警等方面的迫切需求, SpaceX从2021年5月开始发布星链卫星星历数据, 这为星链卫星相关的观测数据匹配、卫星星座定位与构型、碰撞预警等研究带来了更好的条件. 但由于该星历缺乏相应的明确说明给进一步使用带来了困难, 需要对其命名规则、数据构成、数据精度进行初步判断, 以利于后续研究者正确有效地利用该数据.

本文介绍了星链星座的发展现状, 明确了SpaceX发布星链星历文件名的含义, 研究了文件的数据内容, 基于平根数方法初步分析了该星历采用的预报轨道模型, 给出了星链星历中对应于3个主

要运行阶段的轨道精度, 并利用星历数据中的理论设计轨道明确了各星链卫星的定点位置和星座构型参数.

2　星链卫星星历精度分析

2.1　星链卫星星历的发布及格式说明

2021年5月, SpaceX公司为满足国际航天活动和低轨卫星碰撞预警等方面的需求, 开始在Space-track网站上发布星链卫星的星历数据. 目前SpaceX每天在网站上发布3次星链星历, 每隔8 h左右更新1次, 以多个压缩文件存储, 压缩文件最大为1 G左右, 当前每次发布的星历压缩包是2–4个. 解压星链卫星星历压缩包后发现有许多个文件, 每个文件对应1颗卫星, 其名称示例如下: MEME_44713_STARLINK-1007_3312139_Operational_1353879600_UNCLASSIFIED.txt, 可见文件名中包含7个字段, 其中下划线为各字段的分割符.

星链卫星的星历数据显然有助于星链卫星变轨策略和碰撞预警分析等研究工作的开展和应用, 但SpaceX并未发布该星历的相关说明文件, 因此我们首先需要对星历的格式和精度进行分析和确认. Space-track是美国联合太空司令部态势感知部队运营的网站, 该网站对外部来源星历的文件命名和数据格式制定了规则, 要求卫星运营商必须按照相应的规则发布星历文件[6]. 根据发布规则, 对星链星历文件名进行分析, 可得如表2所示的各字段的具体含义.

每个星链卫星星历文件中的数据包括文件头和数千个数据块, 图1显示了卫星星历数据中的文件头和第1个数据块. 可见文件头有4行, 从注释来看, 主要表示星历文件的创建时间、起始和结束时间、卫星轨道来源、采用的坐标系, 而数据块则给出了历元时刻和卫星状态及其协方差信息, 具体描述如表3所示.

表 2　星链星历文件名描述

Table 2　Description of the filename of Starlink ephemeris

Field	Length	Reference	Meaning
1	4	MEME	Mean Equator Mean Equinox, verified to match $J2000.0$
2	5	44713	Satellite catalog
3	13	Starlink-1007	Satellite name
4	7	3312139	Start time of the ephemeris in UTC, formatted as "DOYHHMM" (Day of Year, hour, and minute values)
5	11	Operational	Ephemeris includes maneuver information
6	10	1353879600	Additional information provided by SpaceX, verified to match the final epoch's GPS time in seconds, formatted as "SSSSSSSSSS"
7	12	UNCLASSIFIED	Security classification of the data

created: 2022-11-27 22:02:31 UTC
ephemeris_start: 2022-11-27 21:39:42 UTC　ephemeris_stop: 2022-11-30 21:39:42 UTC　step_size: 60
ephemeris_source: blend
UVW

2022331213942.000	-6655.1326813914	563.3976530764	1823.1658122975	1.690910117	-4.8400625793	5.7306999875
4.591411938×10^{-7}	$-3.5795002145\times10^{-7}$	$7.2269006355\times10^{-7}$	$-1.5374715464\times10^{-10}$	$-4.4553065481\times10^{-11}$	$1.1454989375\times10^{-6}$	$7.8564715475\times10^{-10}$
$-8.3532004275\times10^{-10}$	$2.7918387768\times10^{-13}$	$1.8411963533\times10^{-12}$	$-4.4177946496\times10^{-10}$	$3.7284238567\times10^{-10}$	$-4.1544672521\times10^{-13}$	$-7.6761812103\times10^{-13}$
$4.7253259853\times10^{-13}$	$-7.0609178875\times10^{-13}$	$4.4496954638\times10^{-13}$	$1.5519321237\times10^{-9}$	$-4.3503607360\times10^{-16}$	$-3.6831561668\times10^{-17}$	$5.5522957399\times10^{-12}$

图 1　星链星历的文件头和第1个数据块

Fig. 1　Header and the first data block of Starlink ephemeris

协方差矩阵按照下三角方式保存, 对应于图1示例的第1个数据块的协方差矩阵如图2所示. 从文件头可以看出数据块历元间隔是60 s, 起止时间跨度为3 d, 因此星历文件中共有4321个数据块. 根据文件头还可以看出星历的创建时间大部分比该星历文件的起始时间晚十多分钟, 一般不超过半小时. 图1示例星历文件的起始时间为Universal Time Coordinated (UTC) 2022年11月27日21:39:42, 仅比星历的创建时间UTC 2022年11月27日22:02:31早20 min左右, 可以断定SpaceX发布的星历并不是星链卫星的事后精密星历, 而基本是卫星未来3 d的预报轨道.

表 3 星链星历数据格式描述

Table 3 Description of the data format of Starlink ephemeris

Description	Row	Meaning
Header	1	Created time of the ephemeris
	2	Start time and stop time of the ephemeris; Epoch interval is 60 s
	3	Orbit propagation model is blend
	4	Covariance values are in the UVW coordinate system, which is equivalent to the RTN (Radial, Transverse, and Normal) system. UVW also marks the end of the header
Data block	5	Epoch time and state vectors (position and velocity)
	6–8	Covariance values

4.591411938×10^{-7}					
$-3.5795002145\times10^{-7}$	$7.2269006355\times10^{-7}$				
$-1.5374715464\times10^{-10}$	$-4.4553065481\times10^{-11}$	$1.1454989375\times10^{-6}$			
$7.8564715475\times10^{-10}$	$-8.3532004275\times10^{-10}$	$2.7918387768\times10^{-13}$	$1.8411963533\times10^{-12}$		
$-4.4177946496\times10^{-10}$	$3.7284238567\times10^{-10}$	$-4.1544672521\times10^{-13}$	$-7.6761812103\times10^{-13}$	$4.7253259853\times10^{-13}$	
$-7.0609178875\times10^{-13}$	$4.4496954638\times10^{-13}$	$1.5519321237\times10^{-9}$	$-4.3503607360\times10^{-16}$	$-3.6831561668\times10^{-17}$	$5.5522957399\times10^{-12}$

图 2 星链星历的协方差排布

Fig. 2 Covariance arrangement of Starlink ephemeris

2.2 发布星历的模型分析

在发布星历的头文件中指出星历预报采用的是混合模型, 理解该模型的具体细节对它的使用具有重要意义. 对星链卫星这类低轨空间目标而言, 地球的非球形引力摄动是造成其轨道根数发生变化的主要摄动力. 将星历中的卫星状态数据转换成不同阶次地球引力场下的拟平均根数[7–8], 可以初步分析外推星历采用的引力场阶次状况. 拟平均根数是密切根数扣除主要摄动力引起的短周期变化后的轨道根数, 由于它消除了短周期变化造成的相位差, 如果采用的引力场摄动阶次合适, 那么在扣除轨道半长径a的1阶和2阶短周期影响后, 平半长径除了在大气阻力摄动下稍有衰减外, 在1阶解的意义下基本保持稳定.

在描述卫星的运动轨道时, 通常以开普勒根数(a, e, i, Ω, ω, M)为基本变量. 其中, e为偏心率、i为轨道倾角、Ω为升交点赤经、ω为近地点幅角、M为平近点角. 然而, 星链卫星的轨道都是偏心率较小的近圆轨道, 继续采用开普勒根数会导致奇异性问题. 为了解决这一问题, 引入第一类无奇点根数(a, i, Ω, ζ, η, λ)[9]. 其中, ζ、η和λ定义为:

$$\zeta = e\cos\omega\,,\ \eta = e\sin\omega\,,\ \lambda = M + \omega\,. \qquad (1)$$

以2022年11月29日发布的位于550 km高度附近工作轨道的Starlink-1007星历为例, 利用平均根

数法分析了发布星历中轨道平半长径的变化. 图3是仅考虑J_2项摄动的平半长径变化, 时间跨度为3 d; 图4是星历文件后半段时间内考虑J_2-J_4项摄动的平半长径变化, 时间跨度为1.5 d; 图5是考虑高阶地球引力场摄动的轨道平半长径变化(以20*20阶次为例), 时间跨度为3 d.

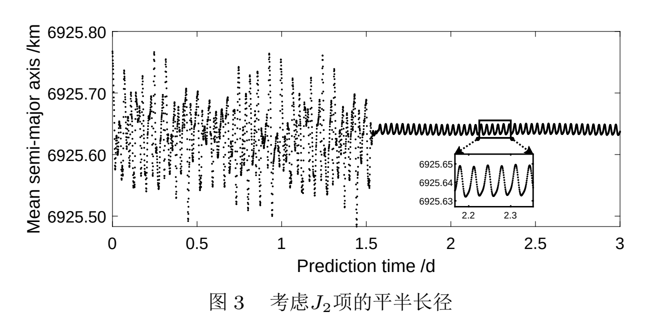


图 3 考虑J_2项的平半长径

Fig. 3 Mean semi-major axis with J_2

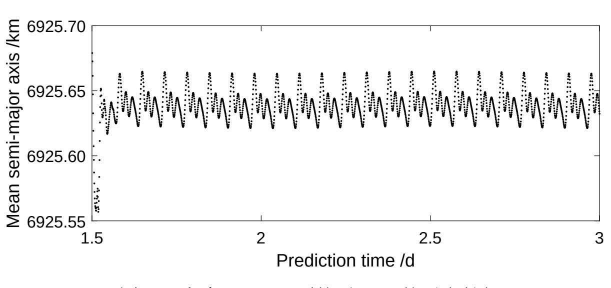


图 4 考虑J_2-J_4项的后1.5 d的平半长径

Fig. 4 Mean semi-major axis with J_2-J_4 in the last 1.5 days

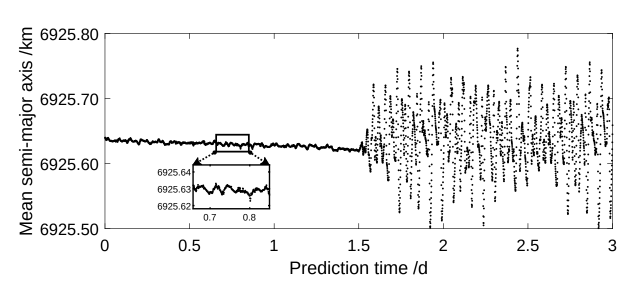


图 5 考虑到20*20阶地球引力场摄动的平半长径

Fig. 5 Mean semi-major axis with 20*20 Earth's gravitational field

对比图3–5发现星历中后1.5 d的平半长径只在图3中保持稳定, 且振幅波动最小, 仅为10 m. 采用相同方法对不同卫星、不同时间和不同阶段的星历进行预报模型分析, 结果如图6及附录所示. 图6及附录中左列图片是仅考虑J_2项的平半长径变化, 右列图片是考虑20*20阶地球引力场的平半长径变化, 时间跨度均为3 d. 结果表明, 星历后段的平半长径基本在仅考虑J_2项时波动最小. 这说明星链星历文件中后部分的星历是仅考虑J_2项摄动的理论设计轨道, 这与大多数低轨卫星的轨道设计理念相符[10]. 对多颗星链卫星平半长径的变化规律统计发现, 对于工作和停泊阶段的星链星历, 其预报模型基本在预报时间约1.5 d处发生突变, 即星历中的后1.5 d是仅考虑J_2项摄动的理论设计轨道. 而抬升阶段的星链星历在大部分预报时间内都采用理论设计轨道, 时间跨度约2.75 d. 这可能与抬升阶段的星链卫星需要持续推进有关. 在卫星抬升过程中, 频繁的机动可能导致其他摄动力对轨道的影响相对较小. 因此, 为了简化计算并反映卫星的轨道演化, 主要采用理论设计轨道作为抬升段卫星的预报模型.

通过对比图3–6还可以发现, 星历文件前部分在仅考虑J_2项摄动时平半长径的振幅超过100 m, 且不稳定. 而在考虑20*20阶(简称20阶, 以下类同)地球引力场摄动后平半长径的振幅优于10 m. 为进一步确定星历前部分采用的地球引力场阶次, 对工作和停泊阶段的星历进行高阶引力场摄动分析: 用平均根数法计算5*5到35*35阶次地球引力场的1阶解析解; 对不同阶次的前1.5 d平半长径进行线性拟合; 根据平半长径的计算值减去拟合函数得到的平半长径期望值计算拟合残差, 进而得出拟合残差的RMS (Root Mean Square).

表4统计了不同卫星星历在各阶次地球引力场摄动下的RMS值. 其中, 前6行数据对应2022年的部分星历. 可以看出, 随着阶数的增加, 星链卫星平半长径对于其拟合值的拟合残差RMS在减小. 当引力场模型考虑到20阶及以上时, RMS几乎保持不变. 因此, 初步推断星历的前部分是至少考虑到20阶非球形引力摄动的外推轨道.

在对多个批次的发布星历进行预报模型分析后发现, 工作和停泊阶段的星链星历在利用高阶引力场进行轨道外推的时间基本在1.5 d左右, 仅有少部分星历的轨道外推时间不足1 d.

对发布星历的持续研究发现, 自2023年1月起,

SpaceX对发布星历的模式进行了调整, 如图7及附录中所示. 图7右侧的图像表明星历前2 d在考虑20阶地球引力场摄动时平半长径的振幅优于10 m. 表4的后6行数据给出了2023年星链星历前2 d在不同阶次引力场摄动影响下的RMS变化, 结果与2022年星历类似. 由此可以判断SpaceX将3个主要运行阶段的星链星历的外推轨道都延长至了2 d, 相应的引力场阶数保持不变.

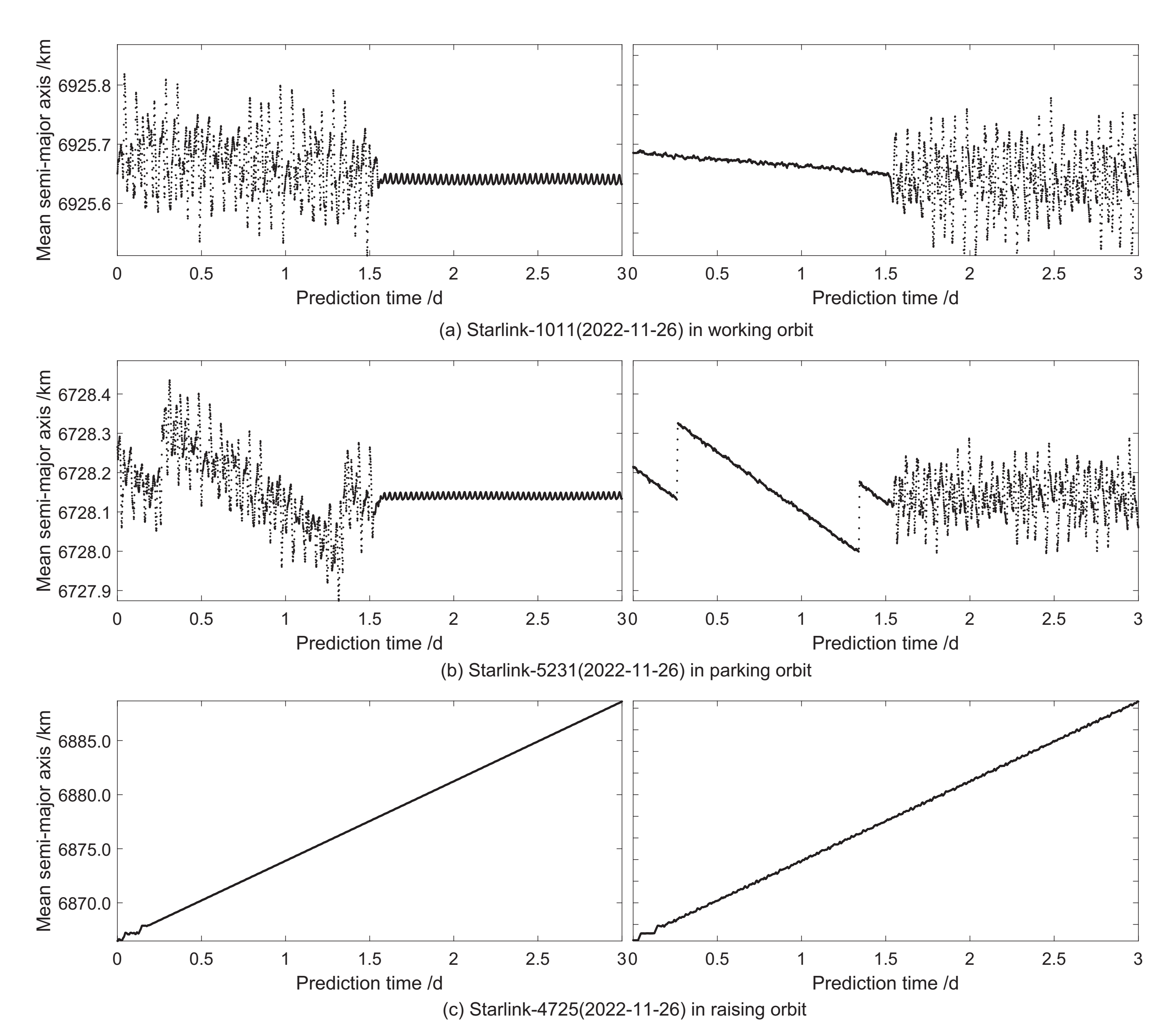


图 6 由2022-11-26发布星历得到的3颗星链卫星的平半长径. 左列仅考虑J_2项摄动, 右列考虑至20*20阶地球引力场.

Fig. 6 Mean semi-major axis of three Starlink satellites derived from the ephemeris released on 2022-11-26. The left column considers only J_2 perturbation, while the right column considers up to the 20*20 Earth's gravitational field.

表 4　考虑高阶地球引力场摄动的平半长径拟合残差的RMS

Table 4　RMS of fitting residuals of mean semi-major axis with high-order Earth's gravitational field

Year	Orbit	RMS/m \ Ephemeris	Order 5	10	15	20	25	30	35
2022	working	Starlink-1007 (2022-11-29)	11.469	2.973	2.039	1.822	1.813	1.790	1.803
		Starlink-1161 (2022-11-29)	11.647	3.069	2.115	1.923	1.962	1.949	1.975
		Starlink-1644 (2022-11-29)	11.429	2.995	2.015	1.779	1.809	1.782	1.793
	parking	Starlink-3654 (2022-04-28)	13.515	4.536	3.389	3.061	3.054	3.218	3.740
		Starlink-3660 (2022-04-28)	14.300	4.428	3.315	3.070	3.217	3.283	3.622
		Starlink-5255 (2022-11-29)	13.399	4.075	2.576	2.124	2.029	2.090	2.295
2023	working	Starlink-1007 (2023-01-26)	11.450	3.054	2.067	1.838	1.831	1.809	1.838
		Starlink-2270 (2023-05-27)	11.427	3.082	2.103	1.885	1.956	2.159	2.659
		Starlink-2564 (2023-05-21)	11.753	3.114	2.229	2.059	2.094	2.233	2.571
	parking	Starlink-5021 (2023-01-26)	13.448	4.475	2.962	2.665	2.572	2.549	2.598
		Starlink-5061 (2023-01-26)	14.772	4.483	2.975	2.586	2.448	2.438	2.465
		Starlink-5698 (2023-02-27)	13.056	4.232	2.845	2.405	2.186	2.186	2.195

2.3　发布星历的内部精度分析

星链卫星的轨道预报精度与诸多航天任务及低轨航天器的碰撞预警规避密切相关. SpaceX发布的星链星历文件包含了卫星状态的协方差信息, 这为判定预报轨道的精度提供了方便. 通过对协方差数据进行分析可以得到星链卫星预报轨道的自评估精度. 根据第1节可知, 星链卫星与火箭分离后主要有停泊、抬升和工作3个运行阶段, 各个阶段的卫星具有不同的轨道高度特征: 停泊轨道的卫星轨道高度在350 km附近; 抬升轨道的卫星轨道高度在350–550 km范围内, 并且随着时间的推移, 轨道高度在逐渐升高; 不同壳层的工作轨道高度也不相同, 目前主要在540 km和550 km附近. 由于不同阶段卫星的控制和摄动因素存在差异, 其轨道预报精度可能不同, 需要分别进行讨论.

随机下载SpaceX在2022年11月29日发布的3184个星链星历, 得到这些星链卫星在未来3 d的预报轨道和协方差信息. 以轨道高度特征为依据, 对3184个星历文件进行分类, 得到98颗停泊轨道、144颗抬升轨道和2878颗工作轨道卫星. 另外还有64颗卫星呈现出与以上3个阶段不同的轨道高度特征, 其中有部分卫星的轨道高度呈下降趋势, 还有部分卫星则停留在不同高度的航点轨道[1], 需要另外讨论. 我们主要针对上述3个运行阶段的卫星进行了轨道预报精度的分析: 遍历星历文件, 依次提取每个历元的第1、3、6个协方差数据, 开方得到U、V、W方向的预报轨道自评估误差. 初步检查误差值后发现, 同一阶段星链卫星的轨道预报精度呈现出几乎相同的变化趋势. 在以高度特征划分工作状态的过程中, 会存在一些卫星的星历处于过渡的状态, 这会造成统计结果的偏差, 因此采用3σ准则对这些卫星进行剔除, 其中σ表示位置误差的标准偏差. 最后, 统计剔除后的轨道预报误差均值.

[1]https://www.spacex.com/updates/.

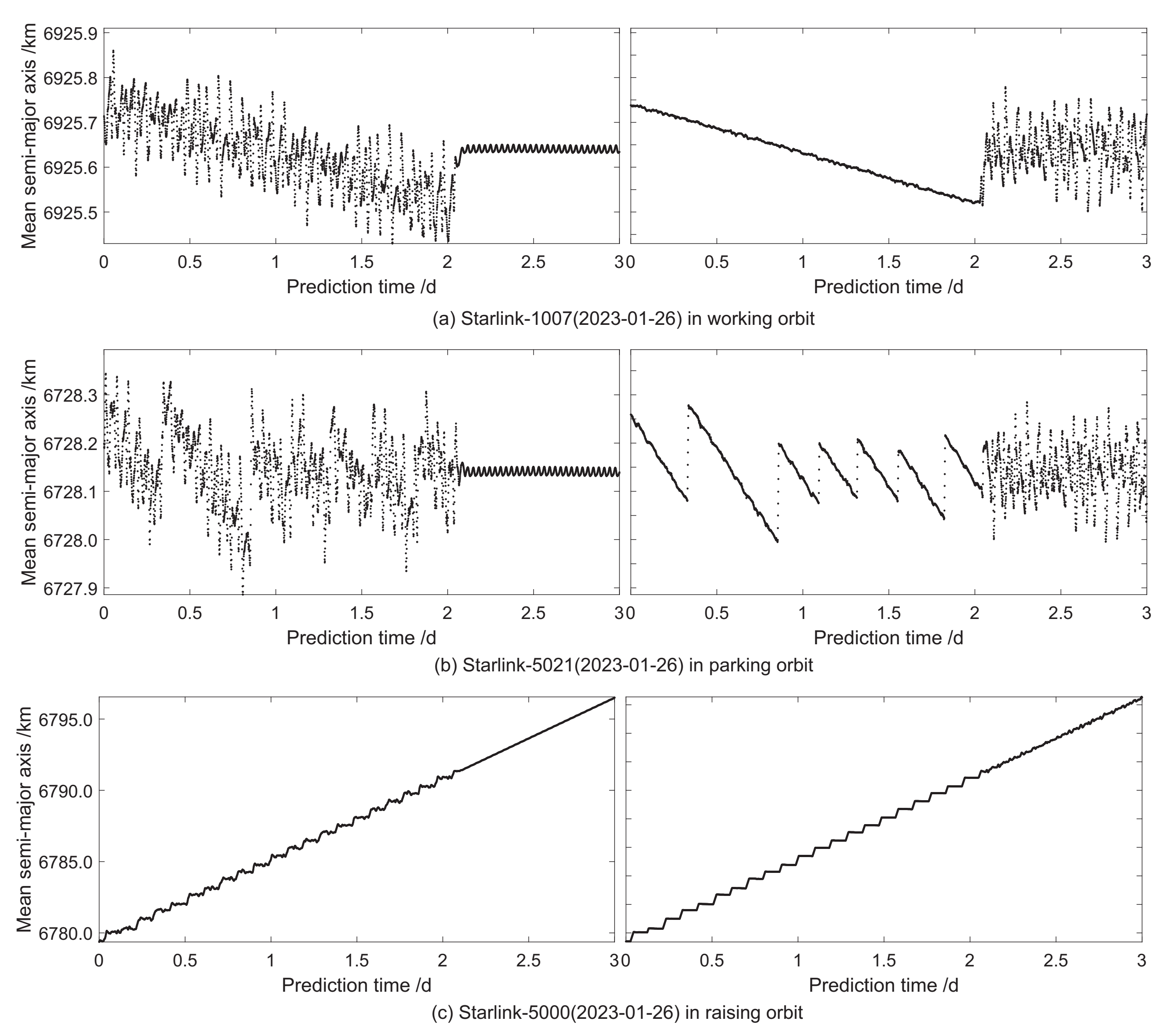


图 7　由2023-01-26发布星历得到的3颗星链卫星的平半长径. 左列仅考虑J_2项摄动, 右列考虑至20*20阶地球引力场.

Fig. 7　Mean semi-major axis of three Starlink satellites derived from the ephemeris released on 2023-01-26. The left column considers only J_2 perturbation, while the right column considers up to the 20*20 Earth's gravitational field.

表5–7分别统计了位于停泊轨道、抬升轨道和工作轨道的星链卫星的轨道预报误差均值随时间的演化, 图8–10则分别给出了各个运行阶段星链卫星在U、V、W方向的轨道预报误差随时间的演化结果, 为了更好展示误差的演化趋势采用对数坐标. 从图表可以看出星链卫星星历精度随着预报弧段长度的增加会从最初的几米发散至数千米, 处于停泊轨道和工作轨道上的卫星在前1 d的轨道预报精度是优于2 km的, 而处在抬升阶段卫星的轨道预报误差在半天不到的时间内迅速增长至千米量级. 无论星链卫星所处的运行阶段, 其星历总是V方向的预报误差占主导, U、W方向的预报误差相对较小, 与沿迹方向的定轨预报本身不稳定相符.

图8和图10的轨道预报误差基本都在1.5 d前后出现跳跃式突变, 这也验证了上节推断的前后两段时间内采用了不同的轨道预报模型, 后1.5 d的预报

仅考虑了J_2项摄动, 而且SpaceX对此时的星历协方差数据给出了一组固定值, 图8和图10中显示其预报误差保持不变. SpaceX之所以采用不同的模型进行轨道外推, 主要是为了平衡用户需求和操作效率, 在星历误差满足当前用户工作需求的情况下, 保证星链星历的高生成效率. 精密星历的外推精度会随着时间的推移快速降低, 外推到1.5 d后的星历误差达到约5 km, 基本满足当时用户工作的需求. 后1.5 d若继续采用高阶次的引力场进行摄动计算, 庞大的星链卫星群将耗费大量的计算资源, 并且其精度可能还不及设计轨道的精度, 因此发布星历中的后半段采用了设计轨道. 对于两种预报模型衔接处的突变, 可能是SpaceX采用某种算法计算这期间的预报误差导致, 至于衔接过程的具体处理方式有待研究.

在抬升段, 图9显示其预报误差在0.15 d后迅速发散至2 km, 与上节推断的抬升段卫星在0.15 d前后采用不同的预报模型相符, 此后在0.25 d左右达到最大值, 然后保持不变, 这也说明抬升的轨道更难预报.

2023年星历模式的改变对预报轨道误差的演化趋势也会产生影响. 图11–13是对2023年1月26日发布的3822个星链卫星星历的误差统计结果. 从图像可以看出SpaceX同样对各个阶段的星历协方差数据给出了一组固定值. 停泊轨道卫星的预报误差大概在预报到1 d时接近给定的误差值, 抬升轨道和工作轨道的卫星分别在0.25 d和1.5 d左右, 此后预报误差保持不变. 另外, 各个阶段的预报误差会在2 d前后出现突变, 与2023年星链星历的预报模型在2 d前后不同相印证.

表 5 停泊轨道星链卫星的预报误差统计

Table 5 Statistics of prediction error for Starlink satellites in parking orbit

Direction	Time / Statistic	0 d	0.5 d	1 d	1.5 d	2 d	2.5 d	3 d
U	Mean/m	0.8	9.0	16.6	39.1	180.0	180.0	180.0
	Standard deviation/m	0.0	0.9	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0
V	Mean/m	0.9	320.1	1199.1	2847.1	6800.0	6800.0	6800.0
	Standard deviation/m	0.0	7.5	32.1	63.9	0.0	0.0	0.0
W	Mean/m	1.1	3.1	4.7	138.4	830.0	830.0	830.0
	Standard deviation/m	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.0	0.0

表 6 抬升轨道星链卫星的预报误差统计

Table 6 Statistics of prediction error for Starlink satellites in raising orbit

Direction	Time / Statistic	0 d	0.05 d	0.15 d	0.25 d	0.35 d	0.45 d	0.55 d
U	Mean/m	0.9	8.3	238.2	536.5	549.6	550.0	550.0
	Standard deviation/m	0.1	4.2	33.3	67.8	3.6	0.0	0.0
V	Mean/m	3.4	35.0	1948.1	4462.3	4504.1	4500.0	4500.0
	Standard deviation/m	0.6	5.2	282.6	289.1	41.1	0.1	0.0
W	Mean/m	1.2	5.2	311.4	722.5	739.3	740.0	740.0
	Standard deviation/m	0.0	0.8	71.6	98.5	7.3	0.0	0.0

表 7 工作轨道星链卫星的预报误差统计

Table 7 Statistics of prediction error for Starlink satellites in working orbit

Direction	Statistic \ Time	0 d	0.5 d	1 d	1.5 d	2 d	2.5 d	3 d
U	Mean/m	0.7	12.0	30.8	63.9	180.0	180.0	180.0
	Standard deviation/m	0.0	2.7	8.2	13.5	0.0	0.0	0.0
V	Mean/m	0.9	309.6	1683.0	4673.0	6800.0	6800.0	6800.0
	Standard deviation/m	0.0	41.1	230.2	606.6	0.0	0.0	0.0
W	Mean/m	1.1	3.3	4.6	138.1	830.0	830.0	830.0
	Standard deviation/m	0.1	0.1	0.2	1.2	0.0	0.0	0.0

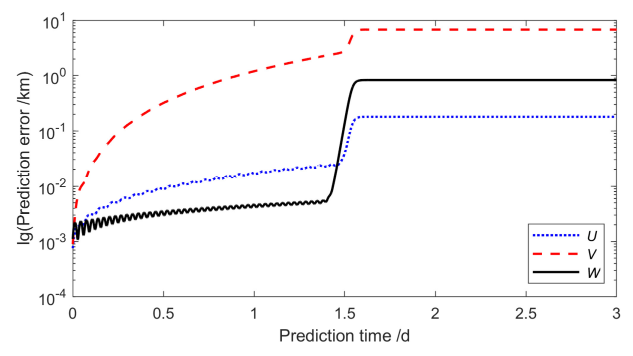


图 8 由2022-11-29发布星历得到的停泊轨道星链卫星的预报误差

Fig. 8 Prediction error for Starlink satellites in parking orbit derived from the ephemeris released on 2022-11-29

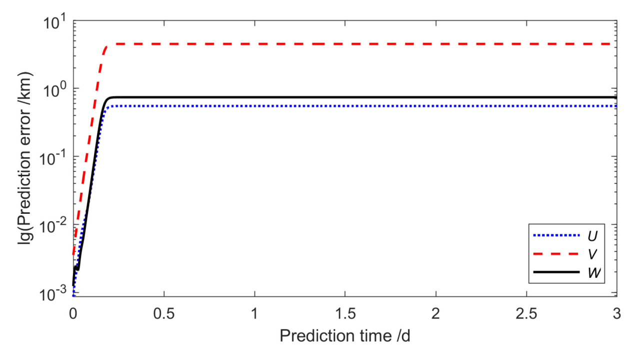


图 9 由2022-11-29发布星历得到的抬升轨道星链卫星的预报误差

Fig. 9 Prediction error for Starlink satellites in raising orbit derived from the ephemeris released on 2022-11-29

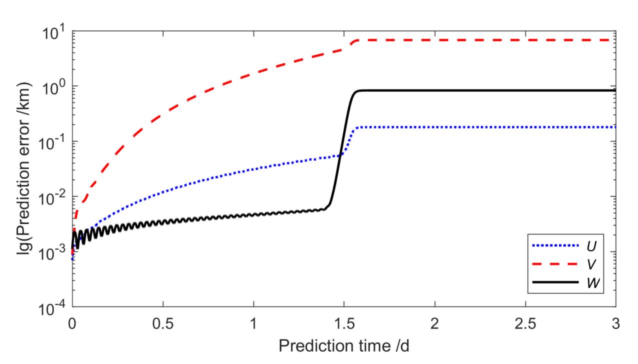


图 10 由2022-11-29发布星历得到的工作轨道星链卫星的预报误差

Fig. 10 Prediction error for Starlink satellites in working orbit derived from the ephemeris released on 2022-11-29

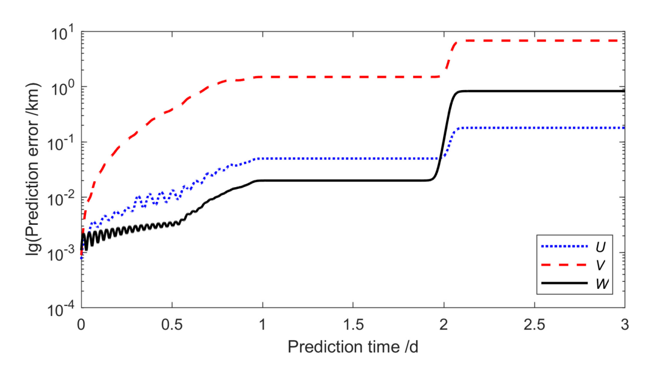


图 11 由2023-01-26发布星历得到的停泊轨道星链卫星的预报误差

Fig. 11 Prediction error for Starlink satellites in parking orbit derived from the ephemeris released on 2023-01-26

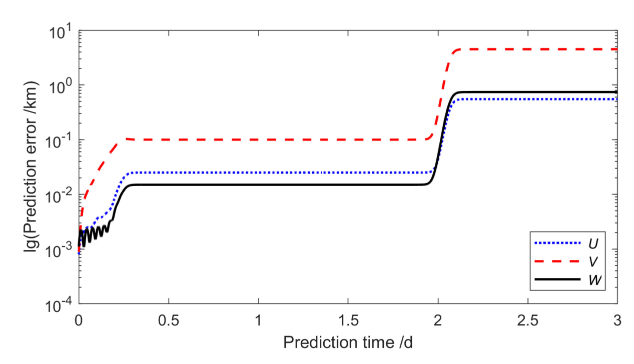


图 12 由2023-01-26发布星历得到的抬升轨道星链卫星的预报误差

Fig. 12 Prediction error for Starlink satellites in raising orbit derived from the ephemeris released on 2023-01-26

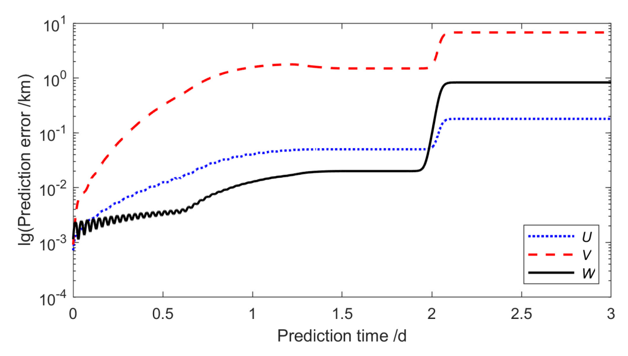


图 13 由2023-01-26发布星历得到的工作轨道星链卫星的预报误差

Fig. 13 Prediction error for Starlink satellites in working orbit derived from the ephemeris released on 2023-01-26

3 发布星历的初步应用

星链卫星星座系统由多颗卫星组成, 卫星轨道形成稳定的空间几何构型, 卫星之间保持固定的时空关系, 从而完成全球覆盖的快速通信任务. 星座构型是星座的基本要素, 是星座覆盖特性、工作性能以及运行维持能力的决定性因素[11]. 虽然已经有研究者利用TLE数据对星链星座构型进行分析, 如薛文等[12]基于第2–13批星链卫星的TLE数据, 以Walker-δ星座为基础, 从卫星发射入轨和轨道面分布两方面讨论了星链星座的部署情况, 但缺少每颗星的定点位置及精度情况. 在2.2节的研究中发现, 发布星历中含有仅考虑J_2带谐项摄动的理论设计轨道. 这对于研究庞大的星链卫星系统非常有利. 通过分析可以获得更准确的星座构型信息, 包括每颗卫星在某一时刻的标称位置. 通过比较星链卫星的标称位置与定轨计算得到的卫星位置, 可以更好地了解星链卫星的机动触发机制, 有助于研究星链卫星机动策略.

根据SpaceX发布的数据可知, 星链卫星的星座构型是Walker-δ型[13], 特征是同一轨道面内卫星的纬度幅角均匀分布, 且升交点赤经相同; 不同轨道面的升交点赤经按等间隔均匀分布, 且各条轨道对参考平面的轨道倾角相同, 通常用$T/P/F$表示其结构参数. 结构参数$T/P/F$、i和轨道高度h可以完全确定一个Walker-δ星座, 这5个量被称为构型参数, 通常用$T/P/F$: $(i,\ h)$表征. 其中, T表示星座的卫星总数, P表示星座的轨道面数, F表示在相邻轨道面上两颗卫星间的相对相位, 即相位因子. 相邻轨道面的升交点赤经之差为$\Delta\Omega$, 相邻轨道面的对应卫星之间的相位差为Δu:

$$\Delta\Omega = 2\pi/P\,, \tag{2}$$

$$\Delta u = 2\pi F/T\,. \tag{3}$$

根据表1可知, 壳层1是SpaceX部署的第1个星链星座, 其主要设计参数为: 卫星数量1584、轨道高度550 km、轨道倾角53°、轨道面72个. 为确定壳层1星座的构型参数, 基于2023年2月26日SpaceX发布的星链卫星星历中后1.5 d轨道, 考虑由J_2项摄动引起轨道根数的周期变化, 用平根数法将所有星链卫星外推到同一临近时刻, 即UTC 2023年3月2日05:10:22. 选取部署在壳层1的1446颗在轨卫星, 以卫星的升交点赤经为横坐标, 纬度幅角为纵坐标, 得到壳层1星链卫星在不同轨道面的纬度幅角分布, 结果见图14. 由图14可以看出, 壳层1在轨星链卫星的轨道面分布较为均匀, 相邻轨道面的升交点赤经间隔约为5°, 同一轨道面上有18–22颗卫星, 每个轨道面内几乎都有18颗卫星的纬度幅角在0–360°均匀分布, 这部分星链卫星被称为工作卫星. 表8对部分轨道面上相邻工作卫星间的纬度幅角差进行了统计, 结果表明, 同一轨道面上, 工作卫星相互间的相位差基本为20°, 其误差大都在0.1°以下.

图14中除少数几个轨道面有空位外, 基本每个轨道面上都有18颗均匀分布的卫星. 由此判断壳

层1总共有1296颗工作卫星, 每个轨道面上额外的1–4颗卫星属于备份卫星, 每颗备份卫星排列在与相邻工作卫星相位差为5°的位置上. 当工作卫星出现故障时, 邻近的备份卫星会通过机动控制及时替换失效卫星, 修复星座构型, 保证星座覆盖性能. 相邻两个轨道面上对应卫星之间的相位差为12.5°, 根据(2)–(3)式, 可知该星座的相位因子为45. 根据以上结果, 壳层1的星座构型确为Walker-δ型, 具体为轨道高度550 km、轨道倾角53°、72个轨道面、每个轨道面18颗, 总共1296颗工作卫星, 表征为1296/72/45: (53, 550). 由此看出星链壳层1的实际在轨分布与建设计划基本相符.

壳层4作为SpaceX主要部署的第2个星座, 其主要设计参数为: 卫星数量1584、轨道高度540 km、轨道倾角53.2°、轨道面72个. 用同样的方法计算UTC 2023年3月2日05:10:22的星链轨道, 选取部署在壳层4的1550颗在轨卫星, 得到类似于壳层1的分布结果. 因此, 根据现有部署情况可以看出, 壳层4的星座构型与壳层1基本一致, 仅在轨道高度和轨道倾角上稍有不同. 具体为轨道高度540 km、轨道倾角53.2°、72个轨道面、每个轨道面18颗, 总共1296颗工作卫星, 表征为1296/72/45: (53.2, 540).

表 8 部分轨道面上相邻工作卫星间的相位差

Table 8 Phase difference between adjacent working satellites on some orbit planes

	Plane 1	Plane 2	Plane 3	Plane 4	Plane 5	Plane 6
Phase difference/°	20.001	19.999	19.874	20.001	19.997	20.001
	19.994	19.999	20.120	19.811	19.999	19.996
	20.029	20.001	20.005	20.186	20.001	20.000
	19.999	20.000	19.991	20.000	19.998	19.943
	19.986	20.000	20.004	19.999	19.978	20.061
	19.989	19.994	19.988	20.001	20.002	20.000
	20.004	20.004	19.999	20.003	20.016	19.686
	19.992	20.004	20.018	20.000	19.983	20.315
	20.011	20.001	20.001	20.001	20.016	19.999
	20.001	20.000	20.026	20.000	19.981	20.001
	19.968	20.000	19.812	19.942	20.012	19.999
	20.022	19.783	20.191	20.056	20.008	19.996
	20.006	20.212	19.984	19.998	20.000	20.000
	20.006	19.967	20.001	19.999	19.981	20.001
	19.812	20.033	20.004	20.000	20.019	20.003
	20.161	20.000	20.000	19.942	19.985	20.000
	19.770	20.000	20.002	20.058	20.012	19.999
	20.235	20.003	20.020	20.003	20.012	20.000
Mean/°	19.999	20.000	20.002	20.000	20.000	20.000
Standard deviation/°	0.101	0.074	0.078	0.070	0.014	0.110

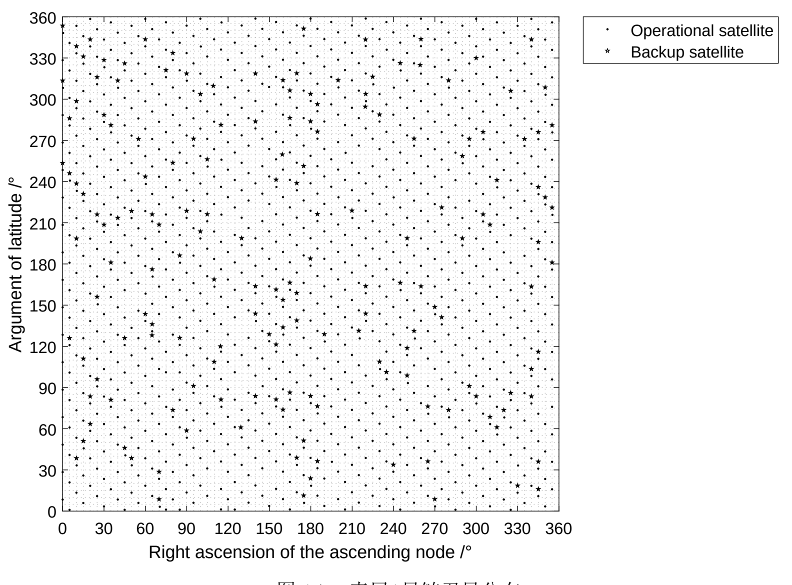


图 14　壳层1星链卫星分布

Fig. 14　Distribution of Starlink satellites in shell 1

4　结论

本文基于星链卫星对低轨航天器的碰撞威胁问题, 对SpaceX发布的星链星历数据进行了研究. 分析了数据文件的命名规则, 发现该发布星历基本上是未来3 d的预报轨道. 利用平根数的方法, 发现星历文件中前半段的星历是基于地球引力场的外推轨道, 引力场阶次不低于20阶, 星历的后半段是基于J_2项的理论设计轨道. 基于星链卫星在停泊、抬升和工作3个运行阶段表现出不同的轨道高度特征, 对各个运行阶段星链星历在U、V、W方向的精度进行了分析, 发现停泊轨道和工作轨道的星链星历精度较高, 其前1 d的轨道预报精度优于2 km, 而抬升阶段的星链卫星的发布星历, 在0.1 d内优于500 m, 超过0.15 d后精度迅速发散至2 km. 利用发布星历的设计轨道, 可以得到各卫星的设计定点位置, 由此分析了星链星座构型, 结果表明壳层1已完成部署, 其构型参数为1296/72/45: (53, 550), 壳层4是第2个完成部署的星座, 其星链星座构型参数为1296/72/45: (53.2, 540). 本文的研究可为扩展星链星历数据的应用、星链卫星的机动变轨策略研究及碰撞预警规避等提供有价值的参考.

参 考 文 献

[1] 张雅声, 贾璐, 刘思彤. 航天电子对抗, 2022, 38: 1
[2] 罗冰显, 王荣兰, 刘卫, 等. 国际太空, 2022, 521: 35
[3] McDowell J C. ApJ, 2020, 892: L36
[4] 张炜, 张荣之, 王秀红, 等. 载人航天, 2022, 28: 606
[5] Li B, Liu L, Sang J. RAA, 2022, 22: 111
[6] 张大鹏, 沈红新. 力学与实践, 2022, 44: 1268
[7] 马剑波, 刘林, 王歆. 天文学报, 2001, 42: 436
[8] Brouwer D. AJ, 1959, 64: 378
[9] 刘林, 胡松杰, 王歆. 航天动力学引论. 南京: 南京大学出版社, 2006: 80
[10] 王瑞, 向开恒, 马兴瑞. 中国空间科学技术, 2002, 5: 16
[11] 张育林, 范丽, 张艳, 等. 卫星星座理论与设计. 北京: 科学出版社, 2008: 30
[12] 薛文, 胡敏, 阮永井, 等. 中国空间科学技术, 2022, 42: 24
[13] Walker J G. JBIS, 1984, 37: 559

Research on Starlink Ephemeris Published by SpaceX

LIU Ai-rong[1,2] XIONG Yong-qing[1,2,3] HUI Jian-jiang[4] XU Xiao-li[1,2,3] GONG Jun[4]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)
(3 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(4 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094)

Abstract Faced with the significant disruption of normal space activities caused by Starlink satellites, the Starlink ephemeris published by SpaceX provides an opportunity for relevant research on Starlink satellites. However, due to the lack of clear instructions, it is challenging to utilize the data further. Analysis of the ephemeris file reveals that it primarily represents the predicted orbit for the next 3 days. Research on mean orbital elements indicates that the front part of the ephemeris is an extrapolated orbit with perturbations up to at least the 20th order of Earth's gravitational field, while the latter part is a design orbit with J_2 perturbation. The ephemeris includes covariance information, providing accuracy details. The covariance indicates that the accuracy of the ephemeris for satellites located in parking and working orbits is better than 2 km in the first day, while the accuracy of satellites in raising orbit increases rapidly to thousands of meters in less than half a day. Utilizing the designed orbit of the ephemeris enables a more accurate analysis of constellation configuration, especially the designated position of each satellite, thus facilitating the identification and tracking of Starlink satellites. The study provides valuable insights for the extensive application of Starlink ephemeris, serving as a beneficial reference for maneuver detection and collision warnings of Starlink satellites.

Key words celestial mechanics, space vehicles: Starlink, ephemerides, methods: mean element, methods: data analysis

附录

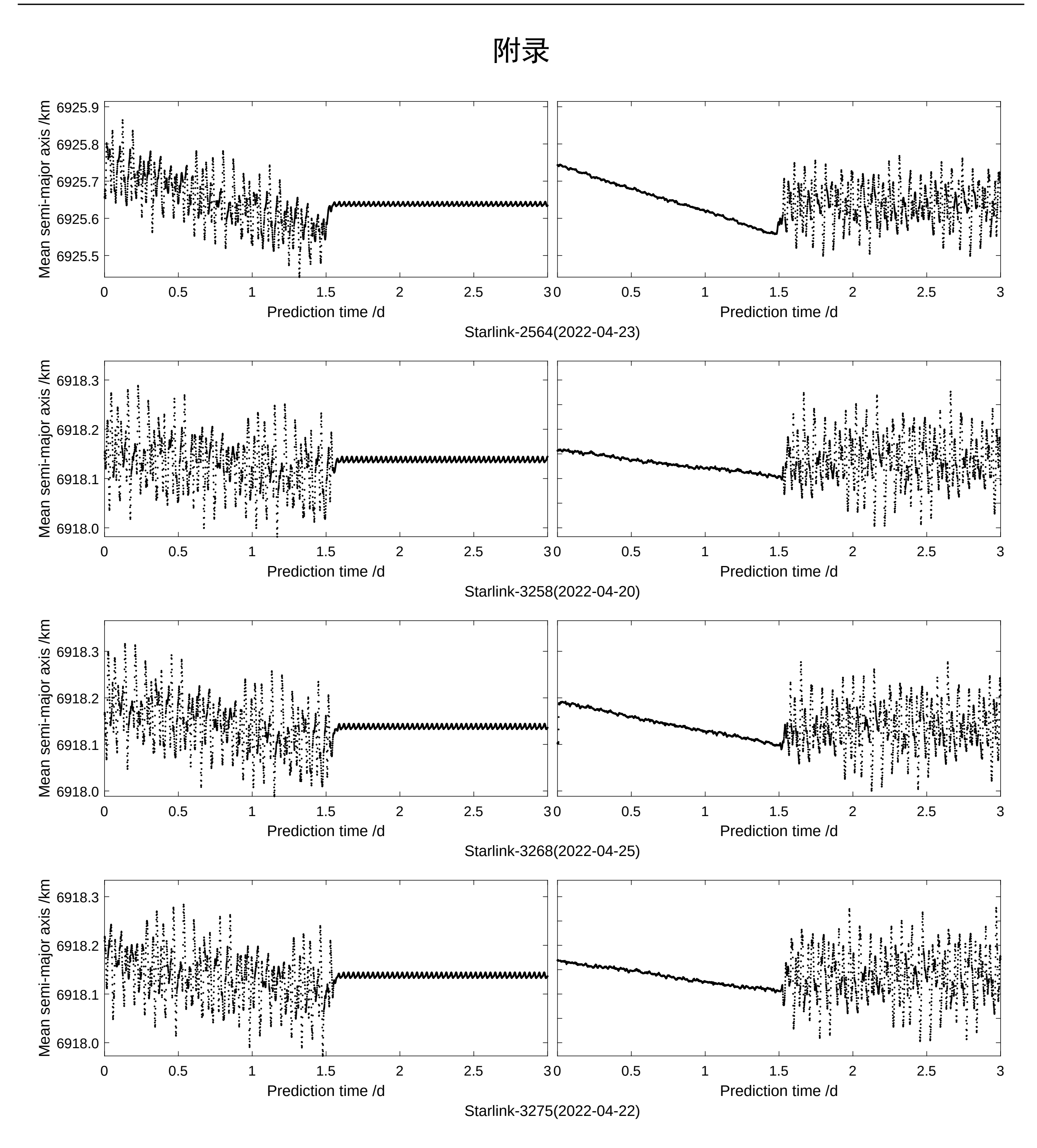


图 15　工作轨道上星链卫星的平半长径. 左列仅考虑J_2项摄动, 右列考虑至20∗20阶地球引力场.

Fig. 15　Mean semi-major axis of Starlink satellites in working orbit. The left column considers only J_2 perturbation, while the right column considers up to the 20∗20 Earth's gravitational field.

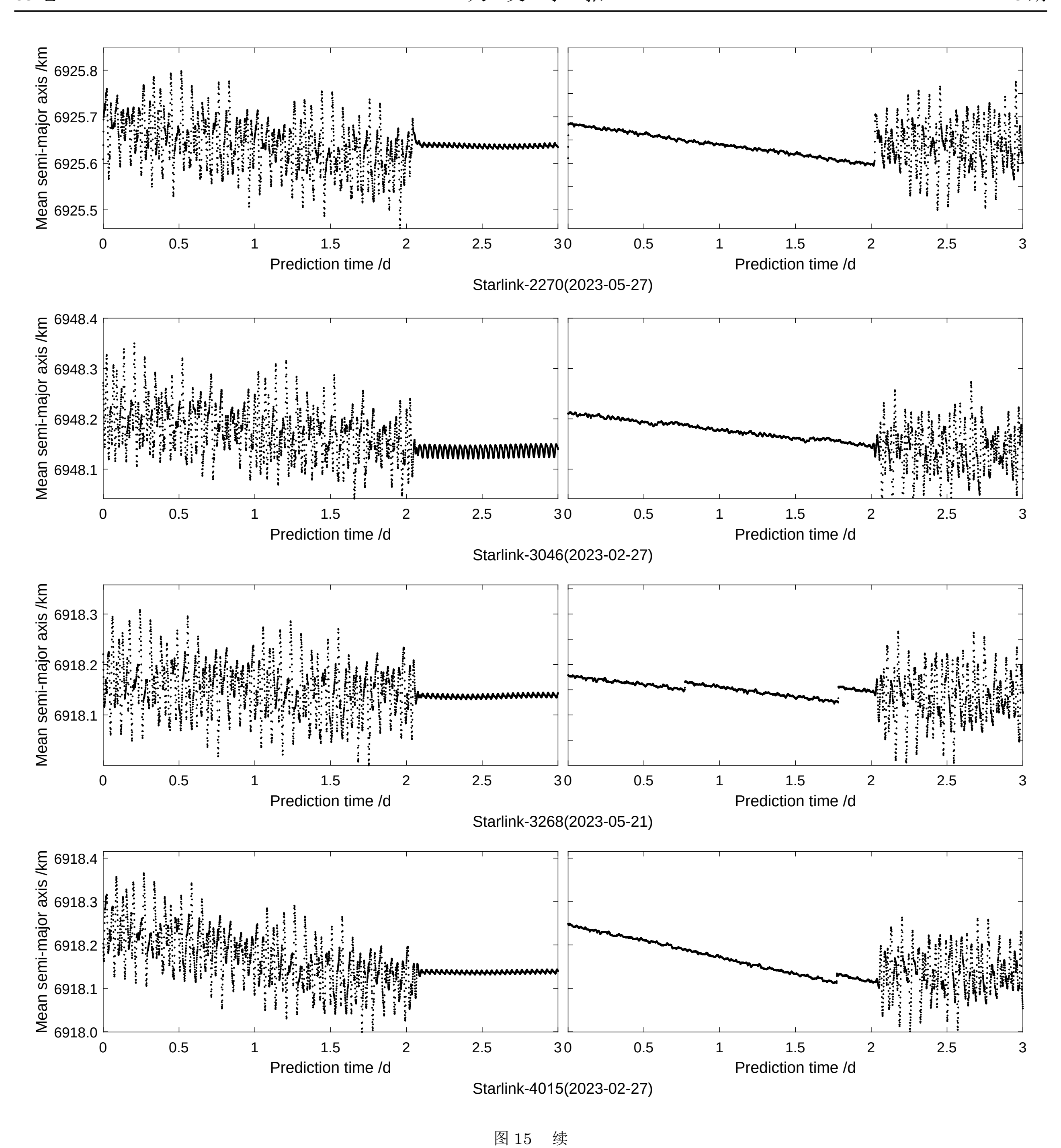


图 15　续

Fig. 15　Continued

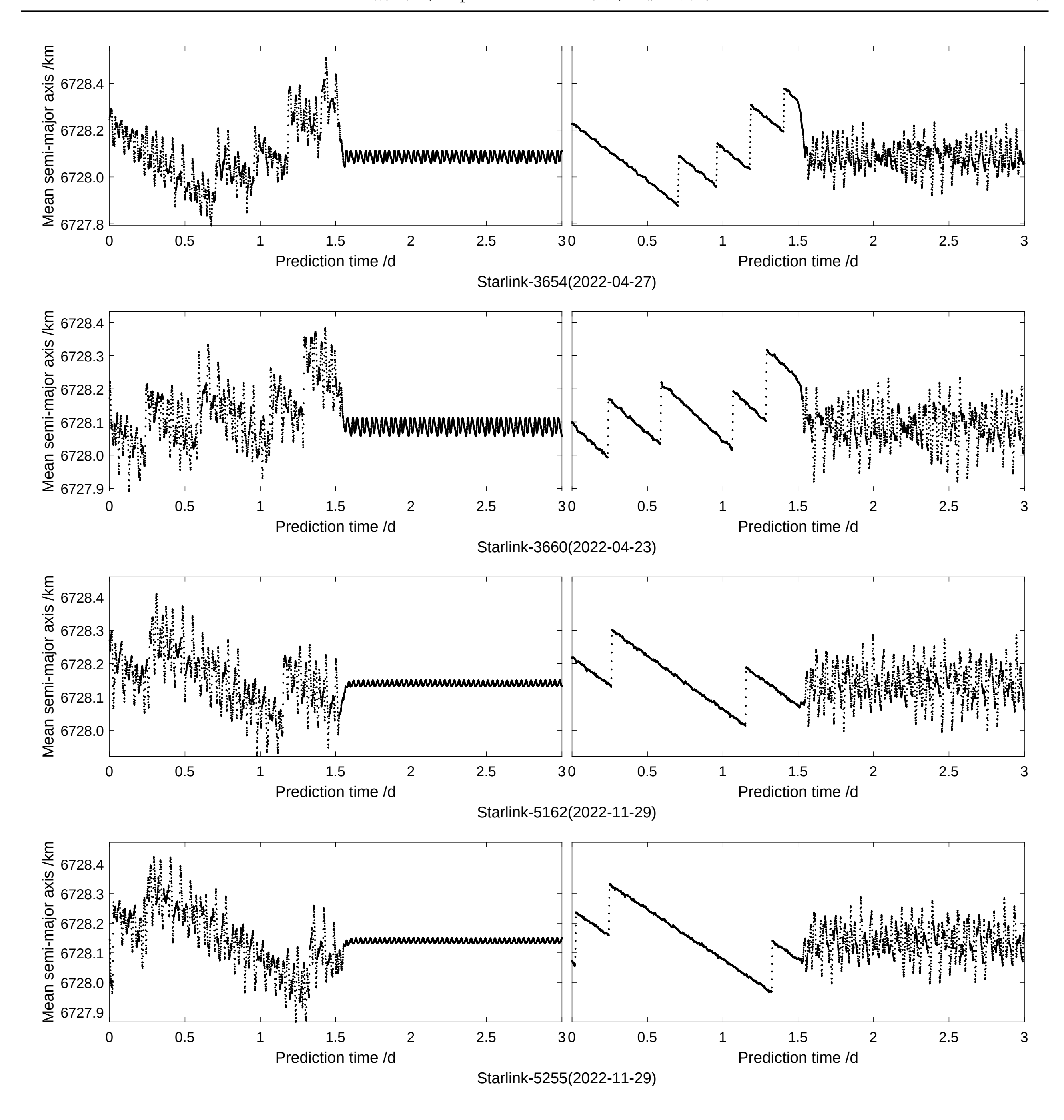


图 16　停泊轨道上星链卫星的平半长径. 左列仅考虑J_2项摄动, 右列考虑至20∗20阶地球引力场.

Fig. 16 Mean semi-major axis of Starlink satellites in parking orbit. The left column considers only J_2 perturbation, while the right column considers up to the 20∗20 Earth's gravitational field.

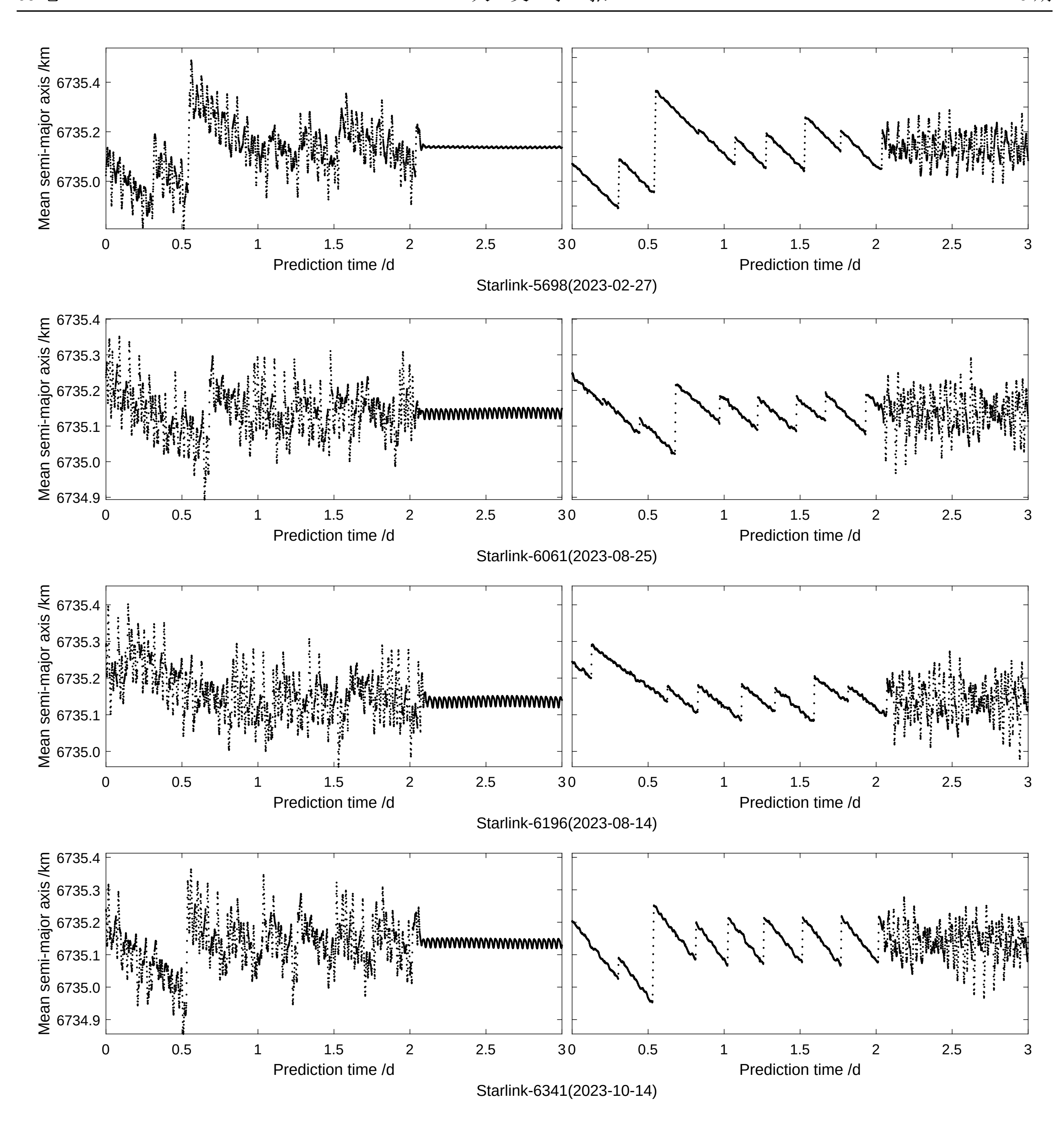


图 16 续

Fig. 16 Continued

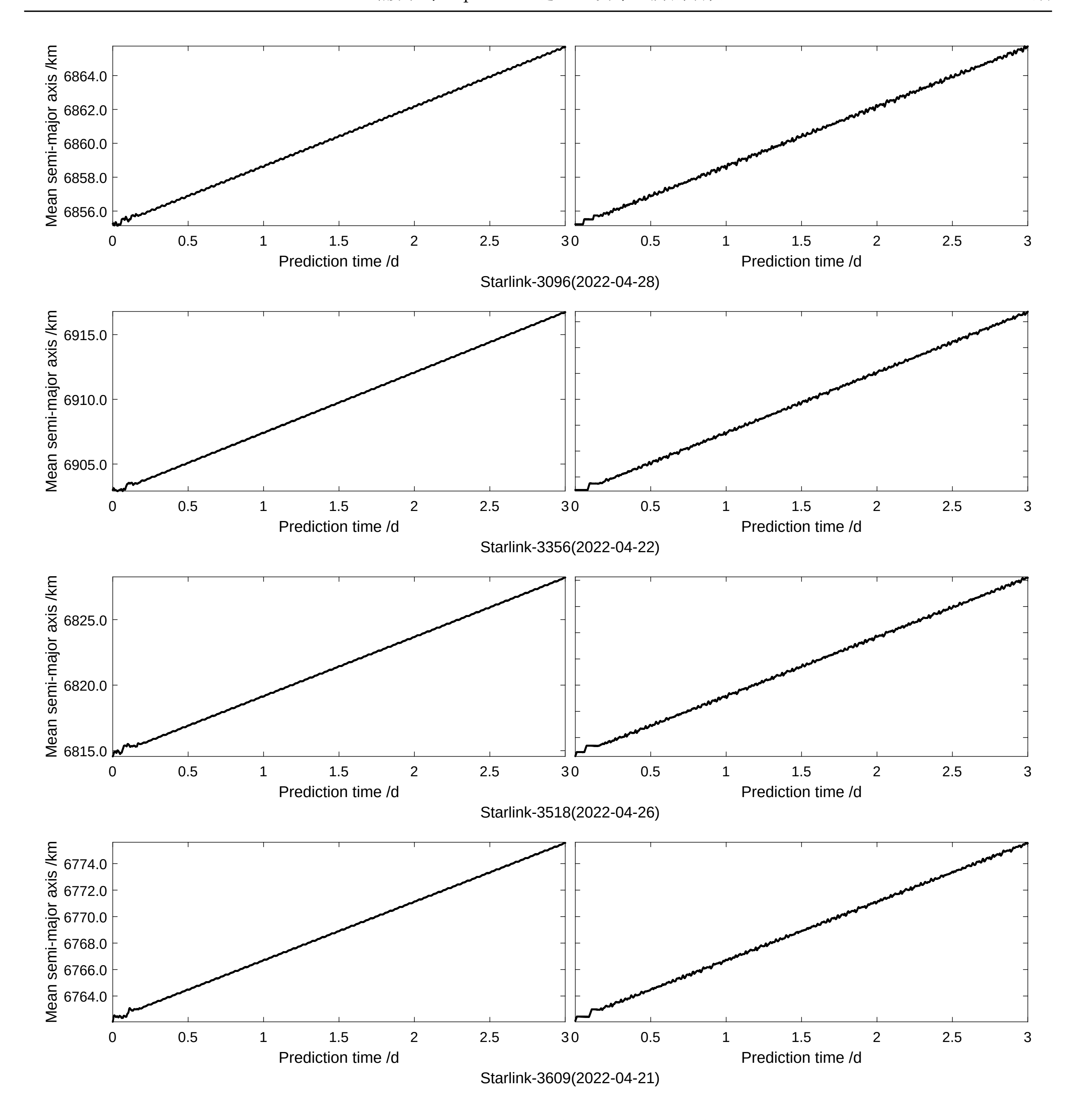


图 17　抬升轨道上星链卫星的平半长径. 左列仅考虑J_2项摄动, 右列考虑至20∗20阶地球引力场.

Fig. 17　Mean semi-major axis of Starlink satellites in raising orbit. The left column considers only J_2 perturbation, while the right column considers up to the 20∗20 Earth's gravitational field.

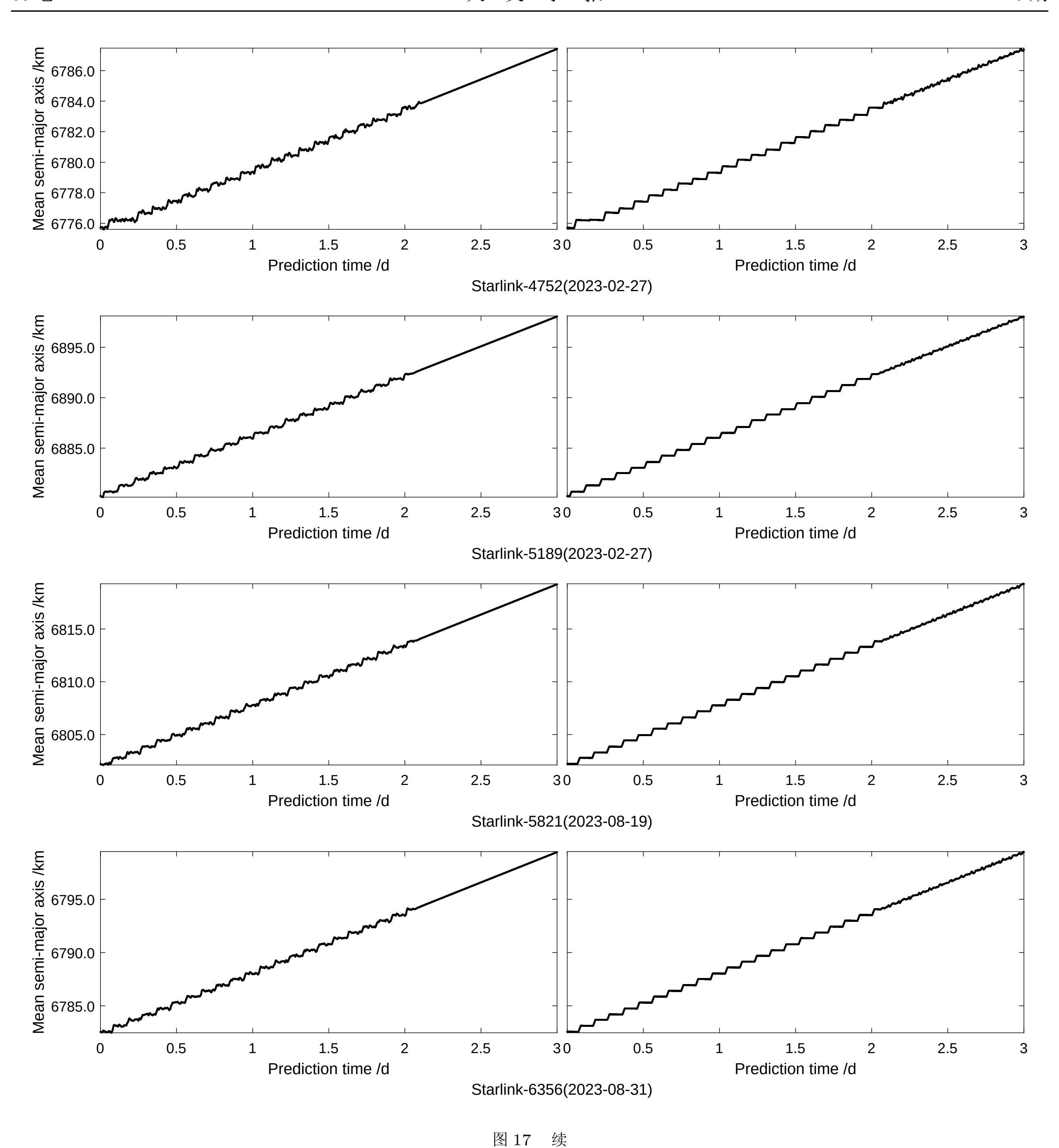


图 17 续

Fig. 17 Continued